



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Solsø : Konsolideringsforsøg

Datarapport

Thorsen, Grete

Publication date:
2003

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Thorsen, G. (2003). *Solsø : Konsolideringsforsøg: Datarapport*. Geoteknikgruppen, Institut for Vand, Jord og Miljøteknik, Aalborg Universitet. AAU Geotechnical Engineering Papers Bind R0314 Nr. 61

General rights

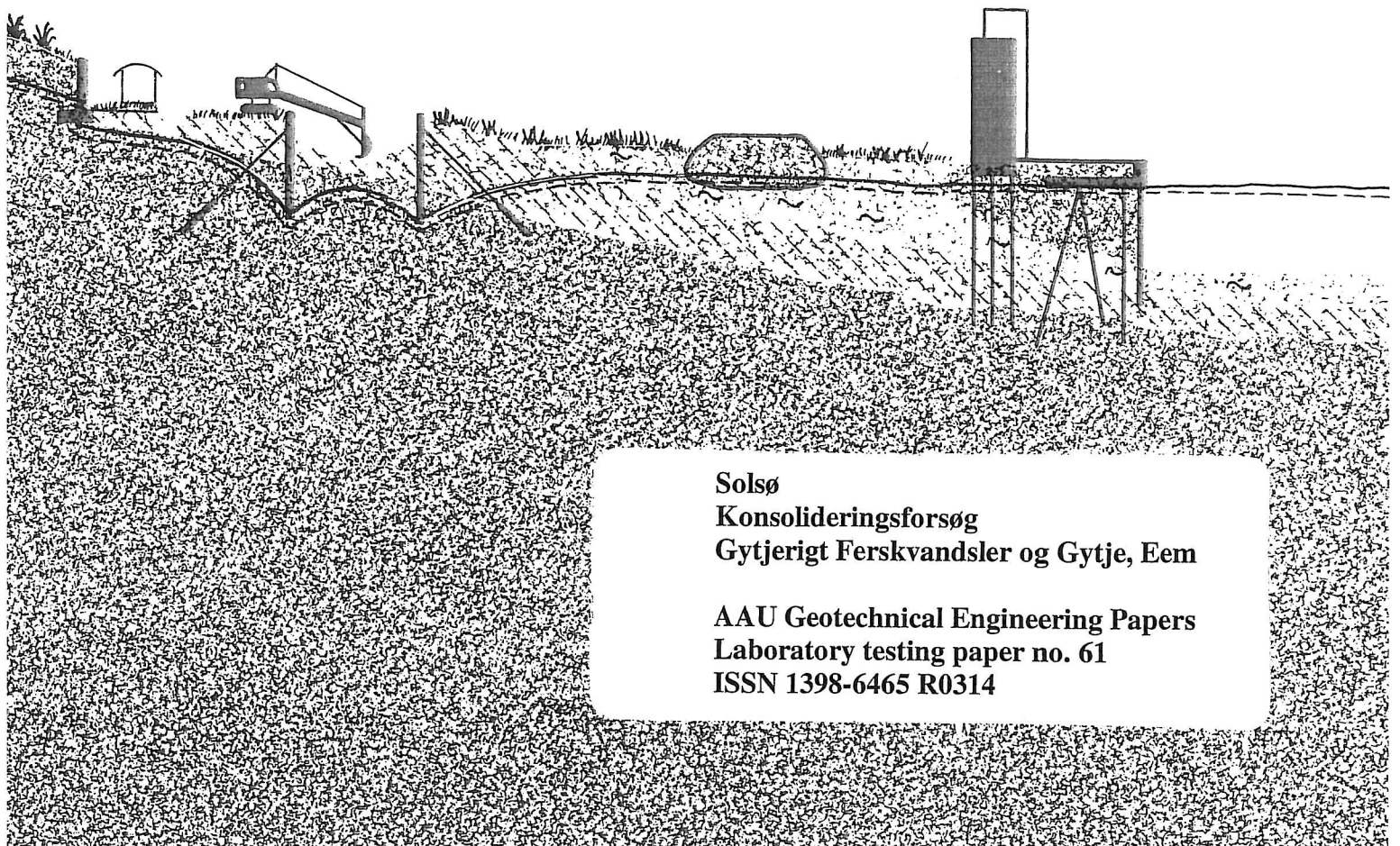
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LABORATORIET FOR FUNDERING
INSTITUTTET FOR VAND
JORD OG MILJØTEKNIK
AALBORG UNIVERSITETSCENTER



Solsø
Konsolideringsforsøg
Gytjerigt Ferskvandsler og Gytje, Eem

AAU Geotechnical Engineering Papers
Laboratory testing paper no. 61
ISSN 1398-6465 R0314



Aalborg Universitet
Geoteknikgruppen
Sohngaardsholmsvej 57
9000 Aalborg
Danmark

Kontaktperson
lektor Grete Thorsen
Tlf.: 96 35 84 54
Fax: 98 14 25 55
e-mail: i5gt@civil.auc.dk

Solsø
Konsolideringsforsøg
Datarapport

Udarbejdet Grete Thorsen

Kontrolleret

Godkendt

Solsø
Konsolideringsforsøg
Gytjerigt Ferskvandsler og Gytje, Eem

AAU Geotechnical Engineering Papers
Laboratory testing paper no. 61
ISSN 1398-6465 R0314

Indholdsfortegnelse	side
1. Indledning.....	3
2. Formål.....	3
3. Forsøgsmateriale.....	3
4. Forsøgsprogram.....	3
5. Tolkning af forsøg.....	4
6. Resultater.....	4
7. Kommentarer til forsøgsresultater.....	7
8. Referencer.....	7

Bilag
no.

1	Situationsplan og boreprofil
2 + 2a	Konsolideringsforsøg. Solsø 13
3 + 3a	Konsolideringsforsøg. Solsø 13.2
4 + 4a	Konsolideringsforsøg. Solsø 17

1. Indledning

Denne datarapport indeholder resultater af konsolideringsforsøg med to prøver af gytjerigt ferskvandsler og en prøve af gytje fra Eem mellemistid. Prøverne er optaget i en boring udført af Kampsax-Geodan, Holstebro, 1995. Situationsplan samt boreprofil er vist på bilag 1 (Larsen & Kronborg, 1994 og Thorsen, 1996)

2. Formål

Det væsentligste formål med forsøgene har været at bestemme forbelastningen for Eem aflejringer, der er aflejret vest for hovedopholdslinien for den sidste iskappe i Weichsel istid samt at sammenligne denne med forbelastningen bestemt for Eem aflejringer fra Hollerup, der er beliggende øst for hovedopholdslinien. Forsøgene med Solsø 13 og Solsø 17 blev udført i 1995 og danner sammen med forsøg med to prøver fra Hollerup grundlag for en artikel, *Oedometer tests – an aid in determination of the geological load history* (Thorsen, 1996).

Senere er forsøgene blevet detailbehandlet og der er suppleret med yderligere et forsøg med prøve 13, Solsø 13.2.

3. Forsøgsmateriale

Materialet er interglacialt gytjeholdigt ferskvandsler og interglacialt ferskvandsgytje fra Eem mellemistid. Prøverne er optaget med en tyndvægget prøveoptager med diameter 70 mm. Solsø 13 og 13.2 er tildannet til en diameter på 60 mm, mens Solsø 17 er ført direkte over i apparatet fra prøveoptageren.

Ved klassifikationsforsøg er bestemt følgende:

	Solsø 13	Solsø 13.2	Solsø 17
Vandindhold %	w = 56.7	w = 63	77.7
Rumvægt kN/m ³	$\gamma = 15.8$	$\gamma = 14.7$	$\gamma = 13.5$
Kalkindhold %	$k_a \sim 0$		$k_a \sim 0$
Glødetab %	$gl \sim 7$		$gl \sim 17$

Bestemmelse af kalkindhold og glødetab er udført af Jens Ildal og Willy Lund.

Prøverne er optaget i en boring, prøve 13 er fra 6.8 m.u.t. og prøve 17 fra 8.6 m.u.t., jfr. bilag 1.

4. Forsøgsprogram

Forsøgene er udført i det danske konsolideringsapparat med prøvestørrelse $h \times d = 30 \times 60$ mm for Solsø 13 og 13.2 og $h \times d = 35 \times 70$ mm for Solsø 17. Apparaterne havde en lille filtersten i det nederste trykhoved og som drænvej er anvendt $H_a = 0,7d$.

Forsøgene er udført ved trinvis belastning og varigheden af de enkelte belastningstrin har varieret en del, det har været væsentligt at sikre en bestemmelse af krybningsdekadehædningen for hvert belastningstrin. Ved forsøget med prøve Solsø 17 er udført to af- og genbelastningskurver. Det var planlagt at udføre en af- og genbelastningsgren før og en efter materialets forbelastningsspænding var nået. Det blev ikke tilfældet, begge af- og genbelastninger ligger tilsyneladende ved spændinger, der er mindre end materialets forbelastningsspænding. Formålet har været at vurdere resultaterne af et belastningstrin, når forbelastningen var kendt.

Forsøgernes arbejdskurver og kurver over variationen af krybningsdekadehædningen fremgår af bilag 2, 3 og 4.

5. Tolkning af forsøg

Der er udført en traditionel tolkning af konsolideringsforsøgene til bestemmelse af forkonsolideringsspændingen, σ'_{pc} , tøjningsindeks, Q , krybningsdekadehældning, ε_s , krybningstøjningsindeks, Q_s , svarende til normalkonsolideret tilstand, samt konsolideringskoefficienten ved 10^0 , $c_{k10} = k_{10}K/\gamma_w$. Resultaterne fremgår af bilag 2a, 3a og 4a. På grund af stor krybningsdekadehældning har en del af tidskurverne været lidt vanskelige at tolke.

For hvert belastningstrin er bestemt konsolideringsmodulen, $K = \Delta\sigma'/\Delta\varepsilon_c$, som stort set svarer til tangentmodulen ved belastningstrinnets middelspænding. Resultatet fremgår af bilag 2a og 3a.

Til bestemmelse af forkonsolideringsspænding er benyttet følgende kriterier (dggf-Bulletin 15, 2001):

- knæk i $\varepsilon_s - \sigma'$ kurven, hvor ε_s når den maksimale værdi (Q_s)
- knæk eller spring i $K - \sigma'_{\text{middel}}$ kurven
- afbøjning fra en ret linie i $\sigma' - \varepsilon_c$ kurve

De aktuelle arbejdskurver er desuden sammenlignet med Terzaghi-kurver, $\varepsilon = Q \log(1 + (\sigma'/\sigma'_k))$, med forskellige værdier for Q og σ'_k , og Casagrandes konstruktion er anvendt til vurdering af størrelsen af σ'_{pc} (afsnit 6, fig. 3 og 4).

Der er fundet rimelig god overensstemmelse mellem de forskellige kriterier.

Ved at antage fuld vandmætning ved forsøgsstart, således at enhver deformation skyldes vandudpresning, er udregnet et begyndelsesvandindhold ved hvert enkelt belastningstrin, værdierne fremgår af bilag 2a, 3a og 4a.

6. Resultater

Arbejdskurverne for de enkelte konsolideringsforsøg fremgår af bilag 2-4a.

De tolkede parametre er:

	Solsø 13	Solsø 13.2	Solsø 17	
Q	~ 22 %	~ 23 %	32 %	
K	~ 4 MPa	~ 6 MPa	~ 8 MPa	for $\sigma' < \sigma'_{pc}$
Q_s	~ 0.7 %	~ 1 %	~ 1.7 %	
$\alpha = Q_s/Q$	= 0.03	= 0.04	= 0.05	
σ'_{pc}	> 0.4 MPa	> 0.4 MPa	> 0.7 MPa	
σ'_0	~ 60 kPa	~ 58 kPa	~ 70 kPa	
OCR	~ 7	~ 7	~ 10	

σ'_0 er den beregnede effektive spænding in situ, OCR = forkonsolideringsgrad = σ'_{pc}/σ'_0

På fig. 1 er optegnet variationen af Q med begyndelsesvandindholdet for hvert enkelt belastningstrin. På figuren er til sammenligning indtegnet kurven ud fra skønsformlen for postglaciale organiske aflejringer $Q = 60(w-25)/(w+40)$.

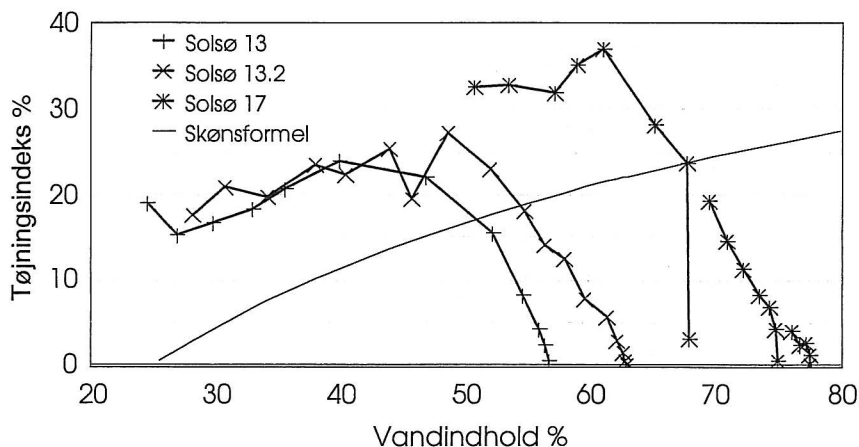


Fig. 1 Variation af $Q = \Delta \epsilon / \Delta \log \sigma'$ med det beregnede begyndelsesvandindhold ved hvert trin

Den ved hvert belastningstrin udregnede værdi for konsolideringsmodulen K er i fig. 2 afsat som funktion af det beregnede begyndelsesvandindhold ved hvert belastningstrin.

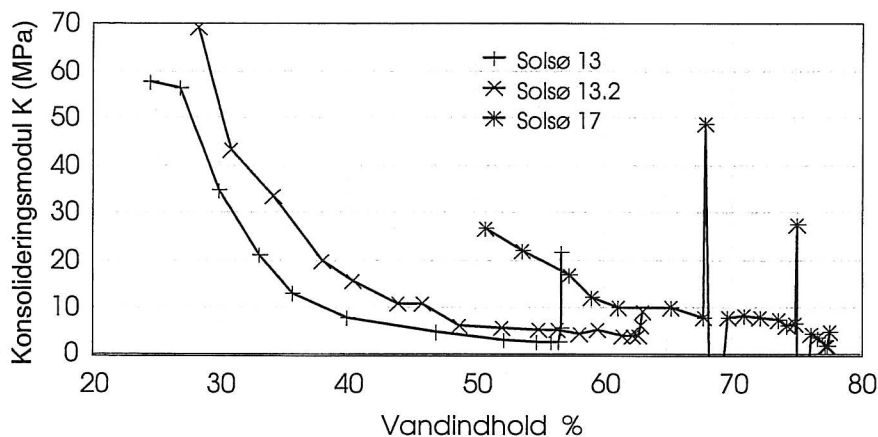


Fig. 2 Variation af K med det beregnede begyndelsesvandindhold ved hvert trin

I det følgende er anvendt Casagrandes konstruktion på en Terzaghi-kurve.

På fig 3 er med fuldt optrukket streg vist arbejdskurverne for Solsø 13 og Solsø 13.2 samt med prikket streg to Terzaghi-kurver med forskellige værdier for Q og σ'_κ :

$$Q = 23\%, \sigma'_\kappa = 200 \text{ kPa}$$

$$Q = 25\%, \sigma'_\kappa = 250 \text{ kPa}$$

På fig 4 er med fuldt optrukket streg vist arbejdskurven for Solsø 17 samt med prikket streg to Terzaghi-kurver med forskellige værdier for Q og σ'_κ :

$$Q = 32\%, \sigma'_\kappa = 400 \text{ kPa}$$

$$Q = 40\%, \sigma'_\kappa = 650 \text{ kPa}$$

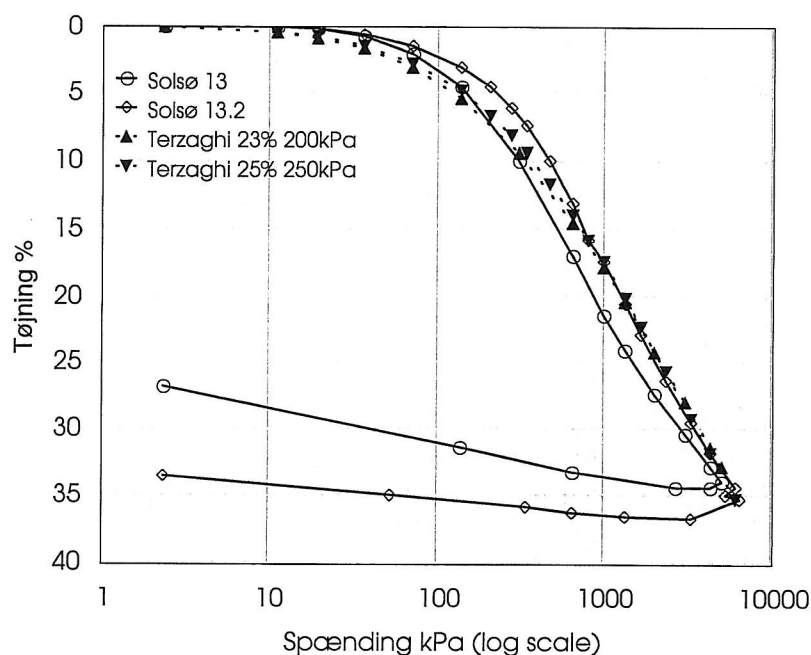


Fig. 3 Arbejdskurve for Solsø 13 og 13.2 sammenlignet med to forskellige Terzaghi-kurver.

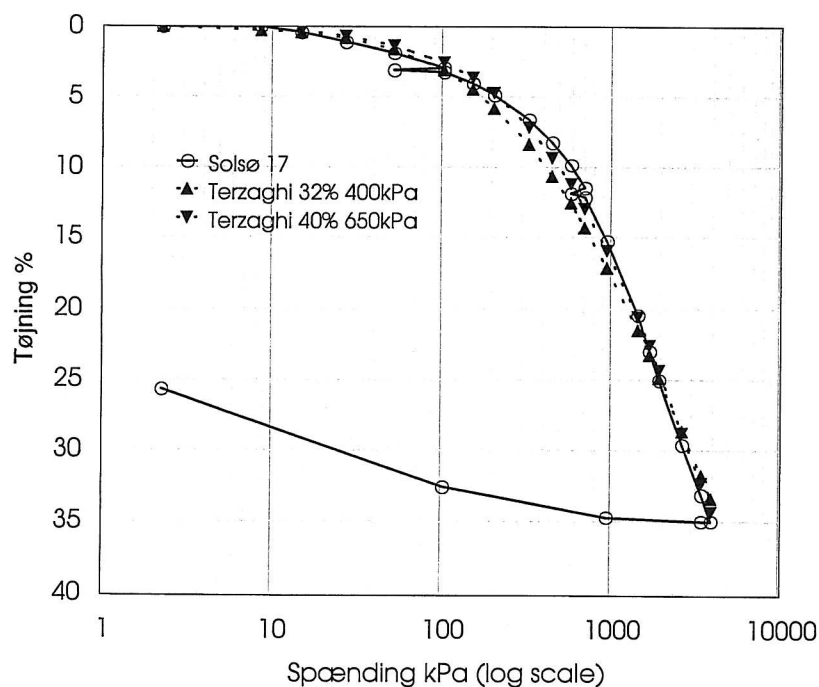


Fig. 4 Arbejdskurve for Solsø 17 sammenlignet med to forskellige Terzaghi-kurver.

På en Terzaghi-kurve, $\varepsilon = Q \log (1 + (\sigma'/\sigma'_\kappa))$, findes kurvens maksimale krumning ved $\sigma' = 0.62 \sigma'_\kappa$,

Anvendelse af Casagrande konstruktion:

Tangenten til kurven i det punkt med størst krumning får hældningen $0.38Q$. Ved en vinkel mellem tangent og vandret på $30^\circ - 40^\circ$, får vinkelhalveringslinien hældningen $\sim 0.17 Q$.

Skæringspunktet mellem vinkelhalveringslinien og kurvens asymptote, $\varepsilon = Q \log (\sigma'/\sigma'_\kappa)$, findes ved $\sigma' \sim 2 \sigma'_\kappa$,

De to optegnede Terzaghi-kurver på fig. 3 ligger begge meget tæt på arbejdskurven for Solsø 13.2. Den maksimale krybningsdekadehældning er ved konsolideringsforsøget med Solsø 13.2 fundet i spændingsintervallet fra 488 til 661 kPa, og ved det forsøget med Solsø 13 i spændingsintervallet 315 til 661 kPa.

Med $\sigma'_k = 200$ kPa fås $\sigma'_{pc} = 400$ kPa,

Ud fra tolkningen må det antages, at forbelastningsspændingen $\sigma'_{pc} > 400$ kPa.

De to optegnede Terzaghi-kurver på fig. 4 ligger begge meget tæt på arbejdskurven for Solsø 17. Det er dog kurven $Q = 40\%$, $\sigma'_k = 650$ kPa, der kommer tættest på. Ud fra denne sammenligning skulle tolkningen altså være $Q = 40\%$ og $\sigma'_{pc} = 2\sigma'_k = 1300$ kPa,

Den maksimale krybningsdekadehældning er ved konsolideringsforsøget med Solsø 17 fundet i spændingsintervallet fra 1480 til 1735 kPa, hvilket svarer fint hertil.

Når tolkningen alligevel har været $Q = 32\%$, $\sigma'_{pc} > 700$ kPa, skyldes det, at den maksimale Q værdi for de sidste belastningstrin er 32% samt at der ved 716 kPa blev udført en af- og genbelastningsgren, som kan have haft indflydelse på resultaterne af de første belastningstrin herefter.

7. Kommentarer til forsøgsresultater

Der er udført 2 konsolideringsforsøg med materiale fra samme prøve af gytjeholdigt ferskvandsler samt 1 forsøg med en prøve af ferskvandsgytje fra Eem mellemistid. For alle tre forsøg gælder, at en del af tidskurverne har været lidt vanskelige at tolke på grund af store krybningstøjninger i forhold til konsolideringstøjninger. Der kan have været en smule luft i prøverne fra starten, men forsøgsresultaterne tyder ikke på noget væsentligt luftindhold. Resultatet af sammenligning mellem forkonsolideringsgraden mellem prøver fra Hollerup og Solsø er, at forkonsolideringsgraden ved Solsø er mindst lige så stor som ved Hollerup (Thorsen, 2003)

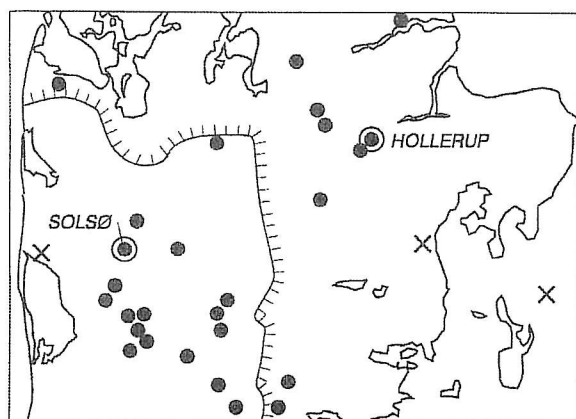
8. Referencer

Dgf-Bulletin 15: *Laboratoriehåndbogen, afsnit 5, konsolideringsforsøg*. Dgf's laboratoriekommité, December 2001. ISBN NO 87-89833-12-0.

Larsen, G. & C. Kronborg, 1994. *Geologisk set. Det mellemste Jylland*. Geografforlaget. Miljøministeriet. Skov- og naturstyrelsen. 1994. ISBN 87-7702-132-0.

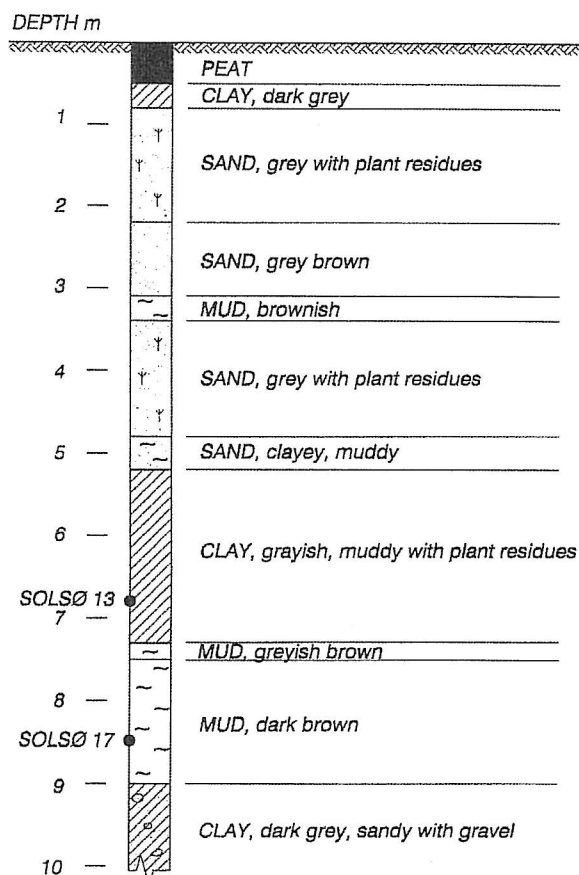
Thorsen, G. 1996: *Oedometer tests – an aid in determination of the geological load history?* Bulletin of the Geological Society of Denmark. Vol. 43 pp. 41-50. Copenhagen 1996

Thorsen, G. 2003: *Hollerup konsolideringsforsøg*. Intern datarapport, Geoteknikgruppen, AAU, 2003



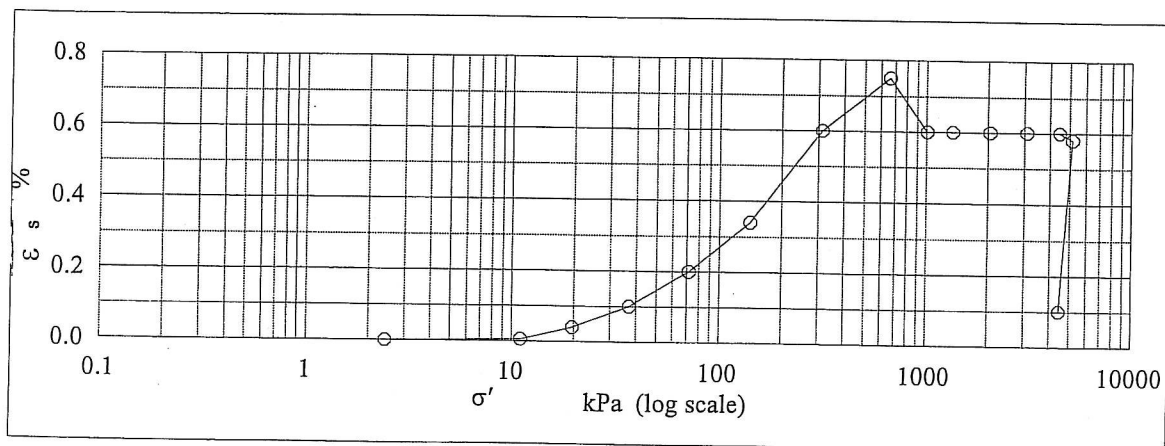
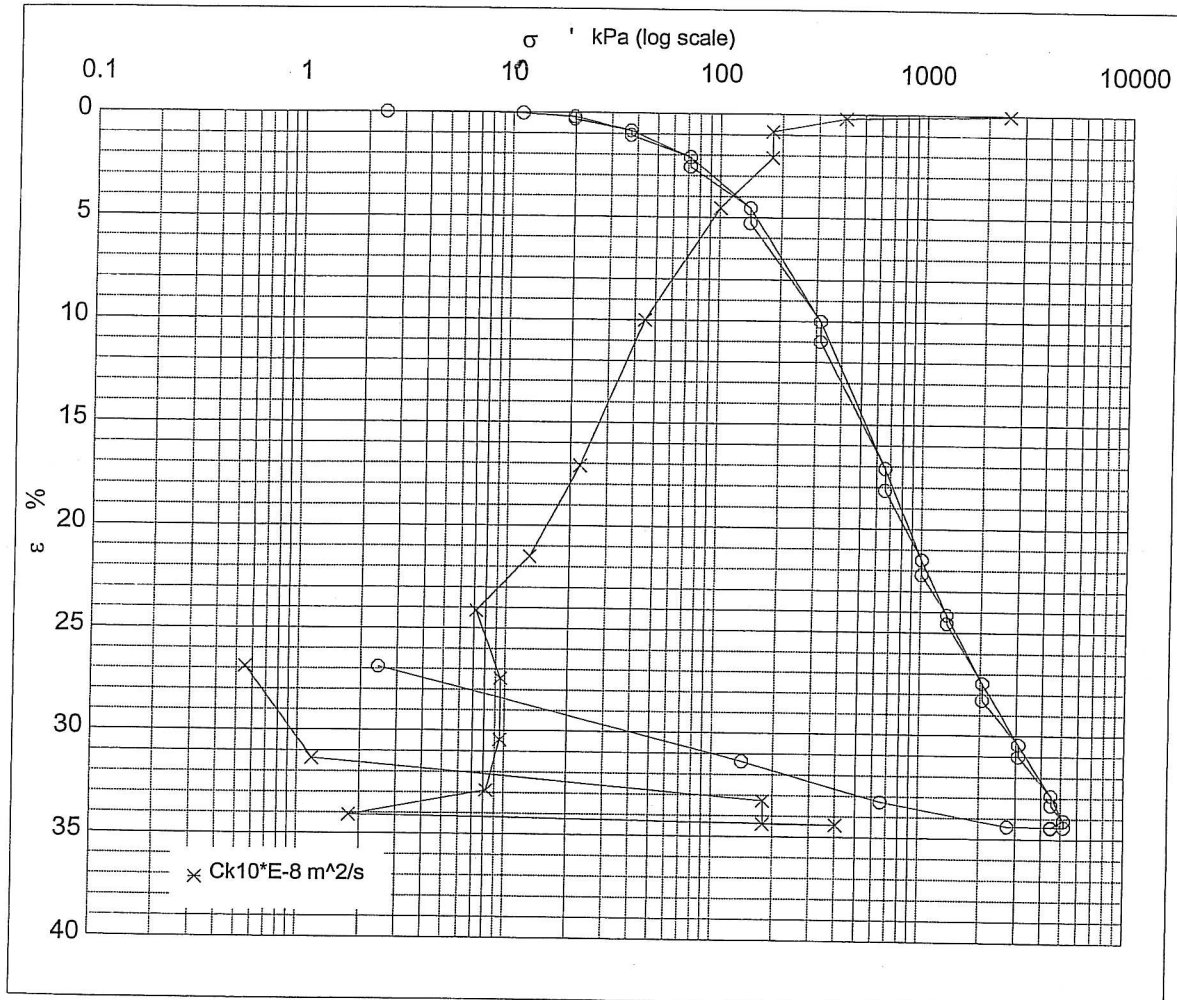
Situationsplan. Beliggenhed af Hollerup og Solsø i forhold til Weichsel isens hovedopholdslinie.

- Forekomst af Eem ferskvandsaflejringer
 - X Forekomst af Eem saltvandsaflejringer
- (efter Larsen & Kronborg, 1994)

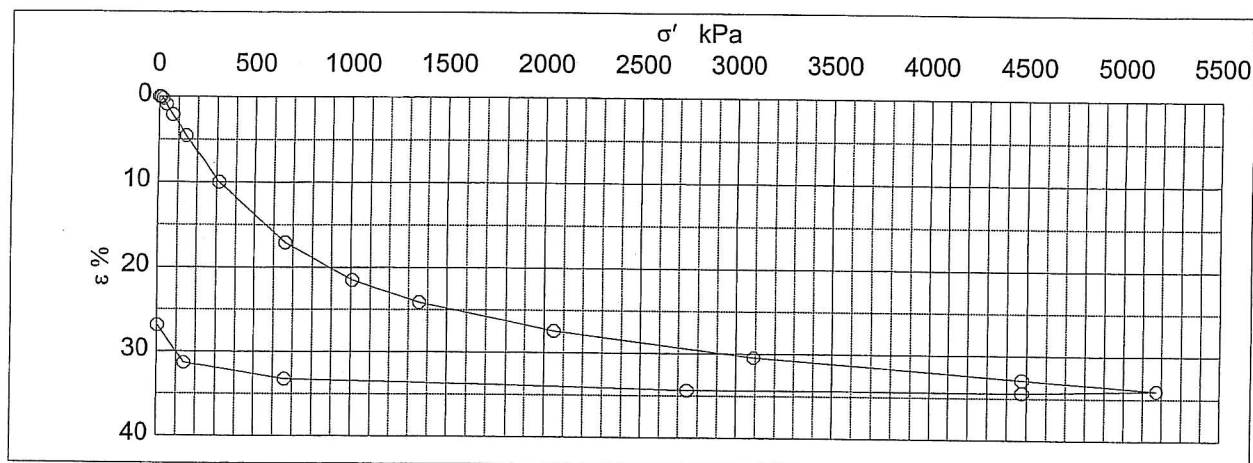
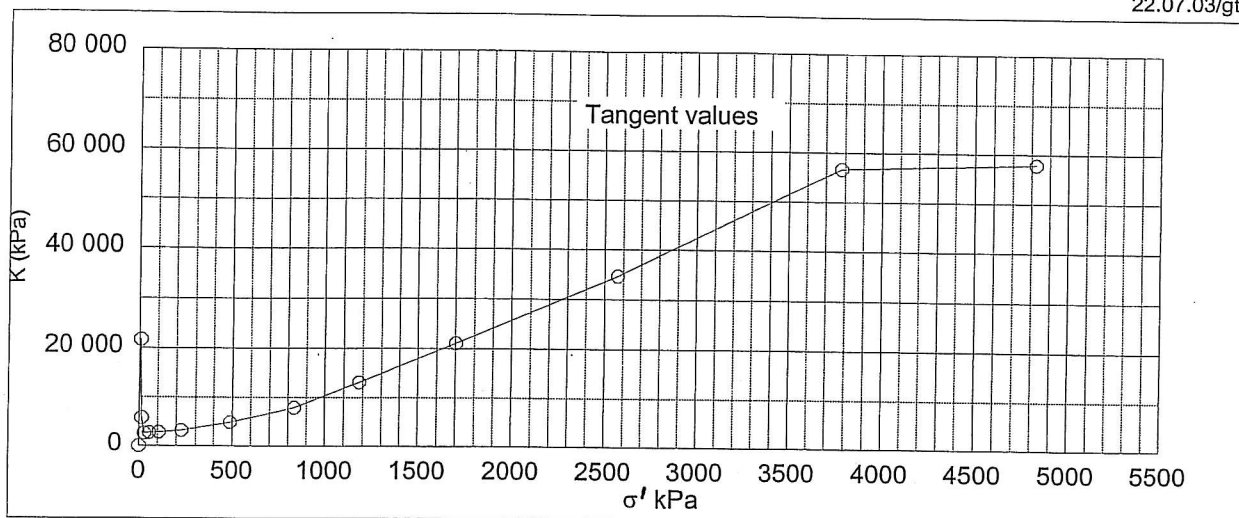


Profil af boring, hvor prøverne Solsø 13 og 17 er optaget (Thorsen 1996)

Description of soil: Ler, gråt, gytjeholdigt, med planterester. EEM				Water content %	Before	After
				Bulk density Mg / m ³	56.7	30.8
				Grain density Mg / m ³	1.61	1.83
					~2.45	
Bor no : Solsø 1	Overburden pressure σ_o	~60 kPa	Void ratio	1.39	0.75	
Lab. no: 13	Vane strength c_v	kPa	Degr. of Saturation %	100	100	
Level : 6.8 m.b.s	CPT - value q_c	MPa	Dimension H x D mm	30x60	22x60	



Job: Solsø		AAU
		Encl. No
		2
Executed:	AMS/gt	Approved
Checked:		



Test results

Q 22 %
 Qs 0.7 %
 σ'_{pc} ~400 kPa

σ' kPa	ϵ_c %	ϵ_s % / lct	ck10 m ² /s	σ'_m kPa	K kPa	w %
2.4	0.00	-	-	-	-	56.7
11.1	0.04	0.01	2.52E-05	6.8	21684.9	56.7
19.8	0.19	0.04	4.04E-06	15.4	5782.6	56.7
37.1	0.85	0.10	1.79E-06	28.5	2628.5	56.5
71.8	2.10	0.20	1.79E-06	54.5	2775.7	55.9
141.2	4.55	0.34	1.01E-06	106.5	2832.3	54.7
314.7	10.00	0.60	4.49E-07	228.0	3183.1	52.3
661.6	17.10	0.75	2.24E-07	488.2	4886.7	46.9
1 008.6	21.50	0.60	1.29E-07	835.1	7885.4	40.0
1 355.6	24.15	0.60	7.18E-08	1 182.1	13092.7	35.7
2 049.5	27.45	0.60	9.56E-08	1 702.5	21027.7	33.1
3 090.4	30.45	0.60	9.56E-08	2 569.9	34695.8	29.9
4 478.2	32.90	0.60	8.24E-08	3 784.3	56646.2	27.0
5 172.1	34.10	0.58	1.79E-08	4 825.1	57826.3	24.6
4 478.2	34.42	0.10	4.04E-06	4 825.1	-218212.4	23.4
2 743.4	34.40	0.00	1.79E-06	3 610.8	8260899.4	23.1
661.6	33.28	0.00	1.79E-06	1 702.5	185870.2	23.1
141.2	31.37	0.00	1.18E-08	401.4	27290.9	24.2
2.4	26.89	0.00	5.54E-09	71.8	3097.8	26.1
						30.5

Remark:

Job: Solso

AAU

Encl. No

2a

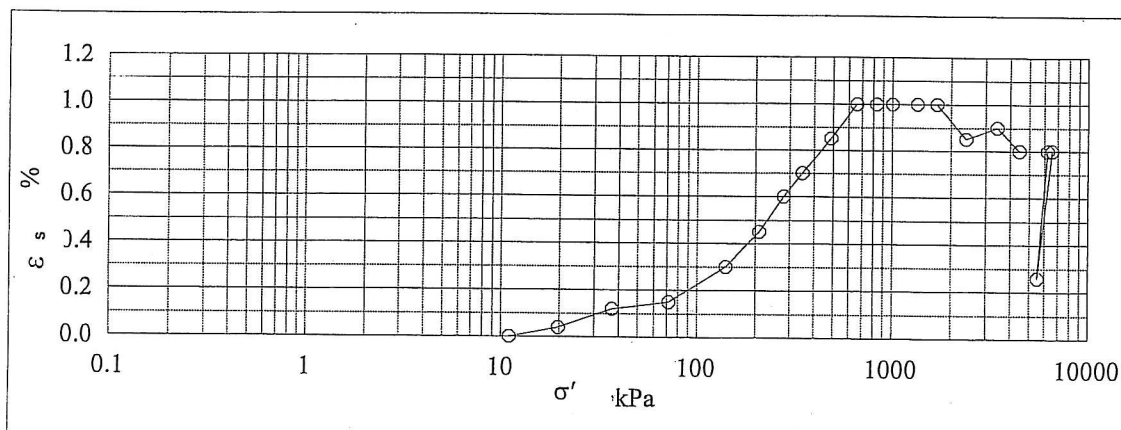
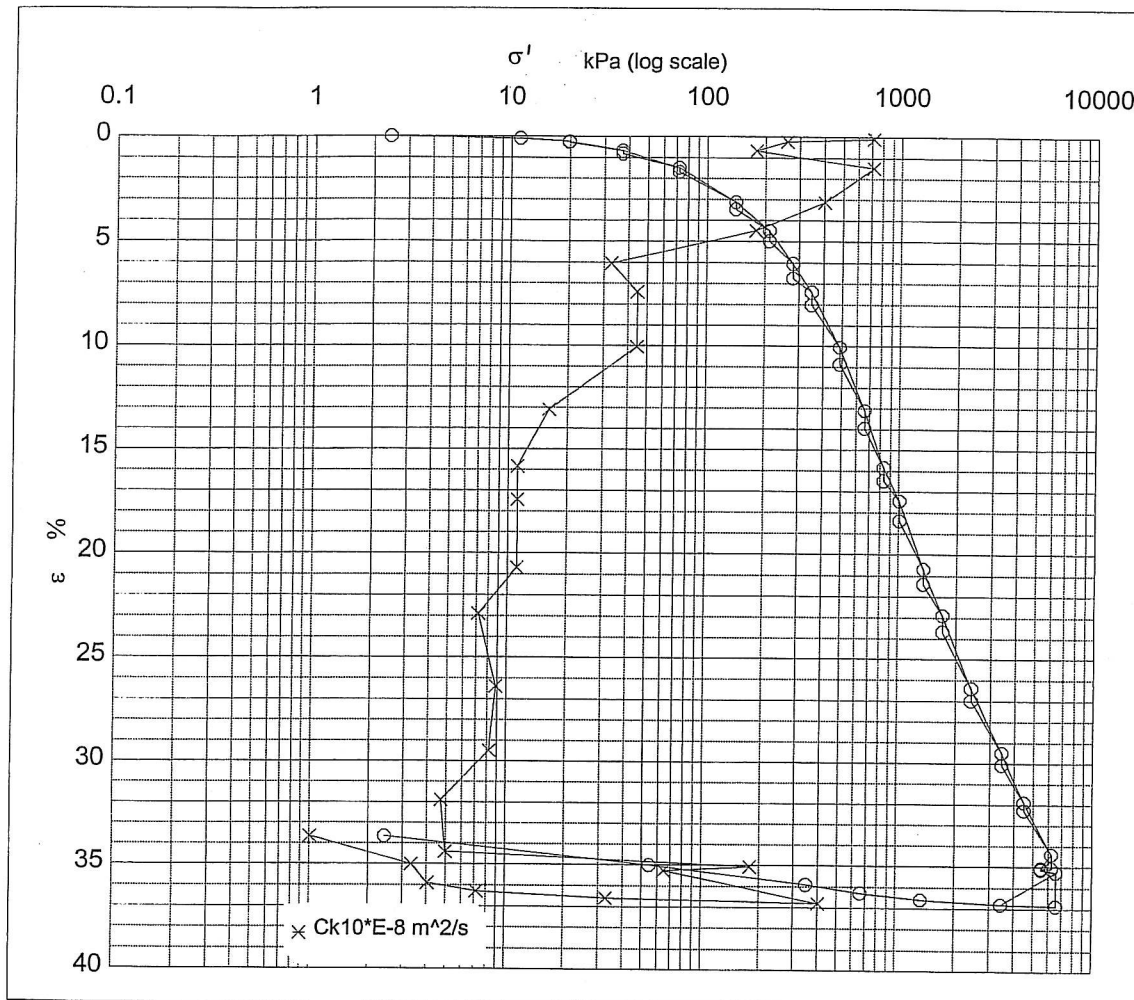
Executed:

AMS/gt

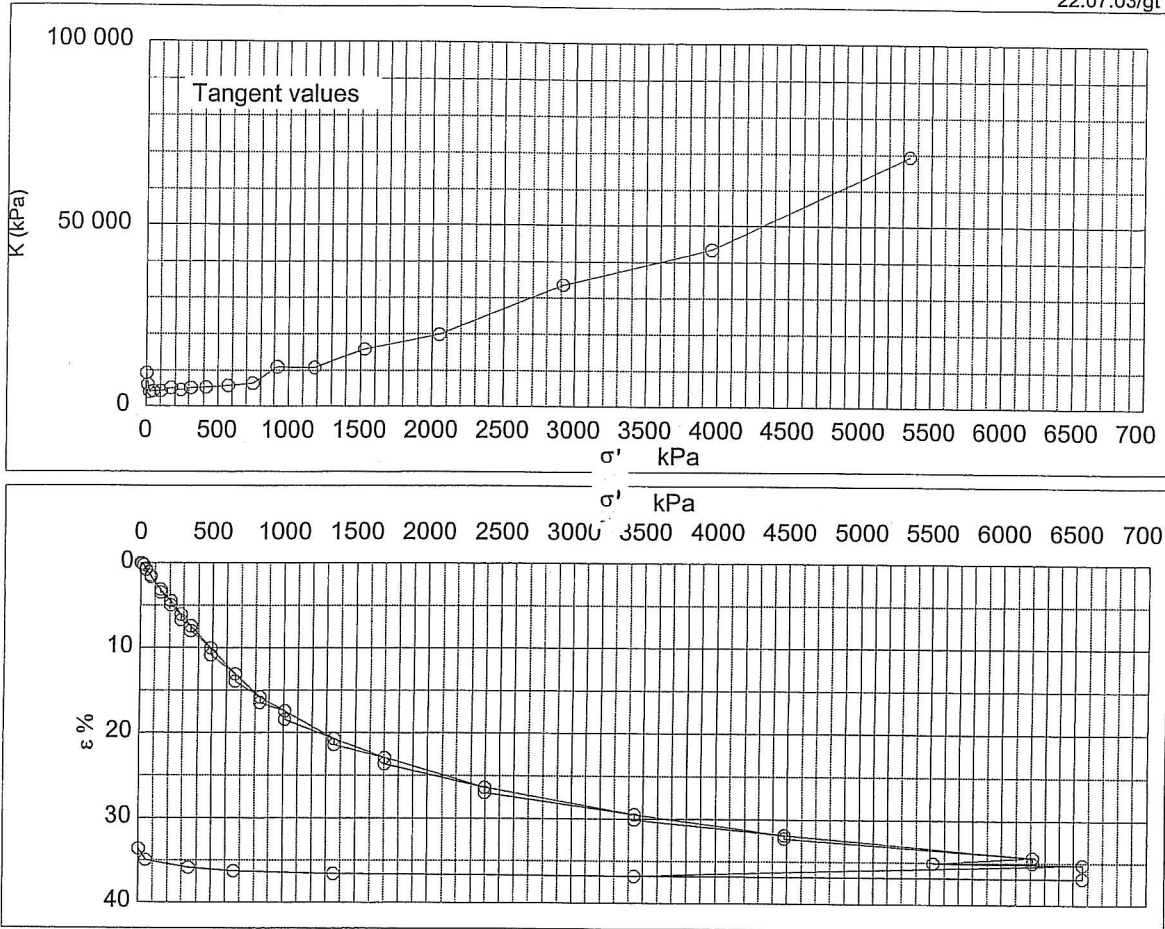
Approved

Checked:

Description of soil: Ler, gråt, gytjeholdgt, med planterester. EEM			Water content %	Before	After
			Bulk density Mg / m ³	63	29.6
			Grain density Mg / m ³	1.5	1.72
				~2.18	
Bor no : Solsø 1	Overburden pressure σ_o	~58 kPa	Void ratio	1.38	0.65
Lab. no: 13.2	Vane strength c_v	kPa	Degr. of Saturation %	100	100
Level : 6.6 m.b.s	CPT - value q_c	MPa	Dimension H x D mm	30x60	21x60



Job: Solsø		AAU
		Encl. No
		3
Executed:	AMS/gt	Approved
Checked:		



Test results

Q 23 %
 Qs 1 %
 σ'_{pc} >400 kPa

σ' kPa	ϵ_c %	ϵ_s % / lct	ck10 m ² /s	σ'_m kPa	K kPa	w %
2.4	0.00					63.0
11.1	0.10	0.00	7.2E-06	6.8	9130.5	63.0
19.8	0.24	0.04	2.6E-06	15.4	5982.0	62.9
37.1	0.68	0.12	1.8E-06	28.5	3942.7	62.7
71.8	1.50	0.15	7.2E-06	54.5	4231.2	62.3
141.2	3.15	0.30	4.0E-06	106.5	4205.5	61.4
210.6	4.50	0.45	1.8E-06	175.9	5140.1	59.6
280.0	6.05	0.60	3.3E-07	245.3	4476.9	58.1
349.4	7.40	0.70	4.5E-07	314.7	5140.1	56.4
488.2	10.05	0.85	4.5E-07	418.8	5237.1	54.9
661.6	13.10	1.00	1.6E-07	574.9	5687.8	52.1
835.1	15.85	1.00	1.1E-07	748.4	6308.3	48.7
1 008.6	17.45	1.00	1.1E-07	921.9	10842.4	45.8
1 355.6	20.70	1.00	1.1E-07	1 182.1	10675.6	44.0
1 702.5	22.90	1.00	7.2E-08	1 529.0	15770.8	40.5
2 396.4	26.40	0.85	8.9E-08	2 049.5	19826.2	38.1
3 437.3	29.50	0.90	8.2E-08	2 916.9	33576.6	34.3
4 478.2	31.90	0.80	4.7E-08	3 957.7	43369.7	30.9
6 213.0	34.40	0.80	5.0E-08	5 345.6	69391.6	28.3
5 519.1	35.07	0.26	1.8E-06	5 866.0	-103879.6	25.6
6 559.9	35.27	0.80	6.5E-07	6 039.5	515283.8	24.8
3 437.3	36.81	0.00	4.0E-06	4 998.6	-202373.3	24.6
1 355.6	36.60	0.00	3.3E-07	2 396.4	986609.8	23.0
661.6	36.30	0.00	7.2E-08	1 008.6	227513.3	23.2
349.4	35.91	0.00	4.0E-08	505.5	80687.9	23.5
54.5	35.01	0.00	3.3E-08	201.9	32659.4	23.9
2.4	33.66	0.00	1.0E-08	28.5	3849.4	24.9

Remark:

Job:

Solsø

AAU

Encl. No

3a

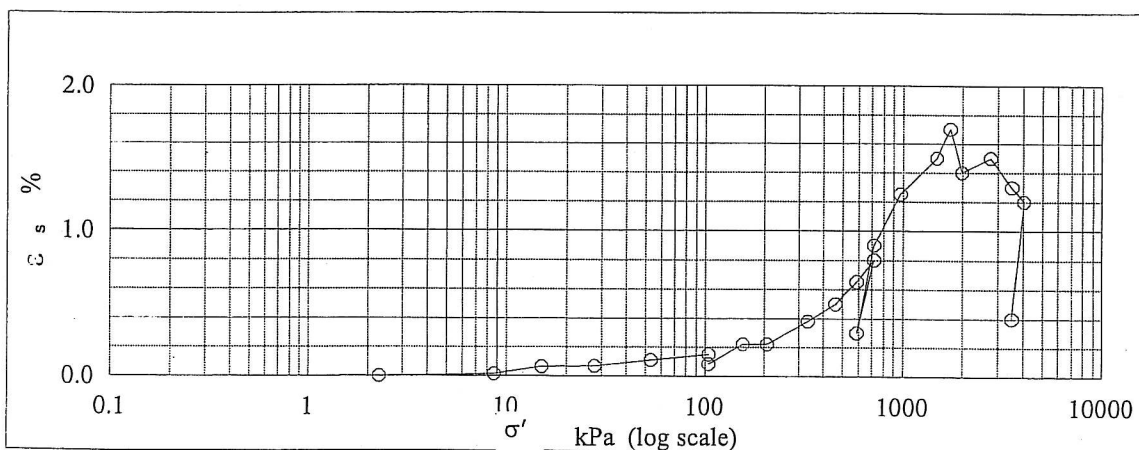
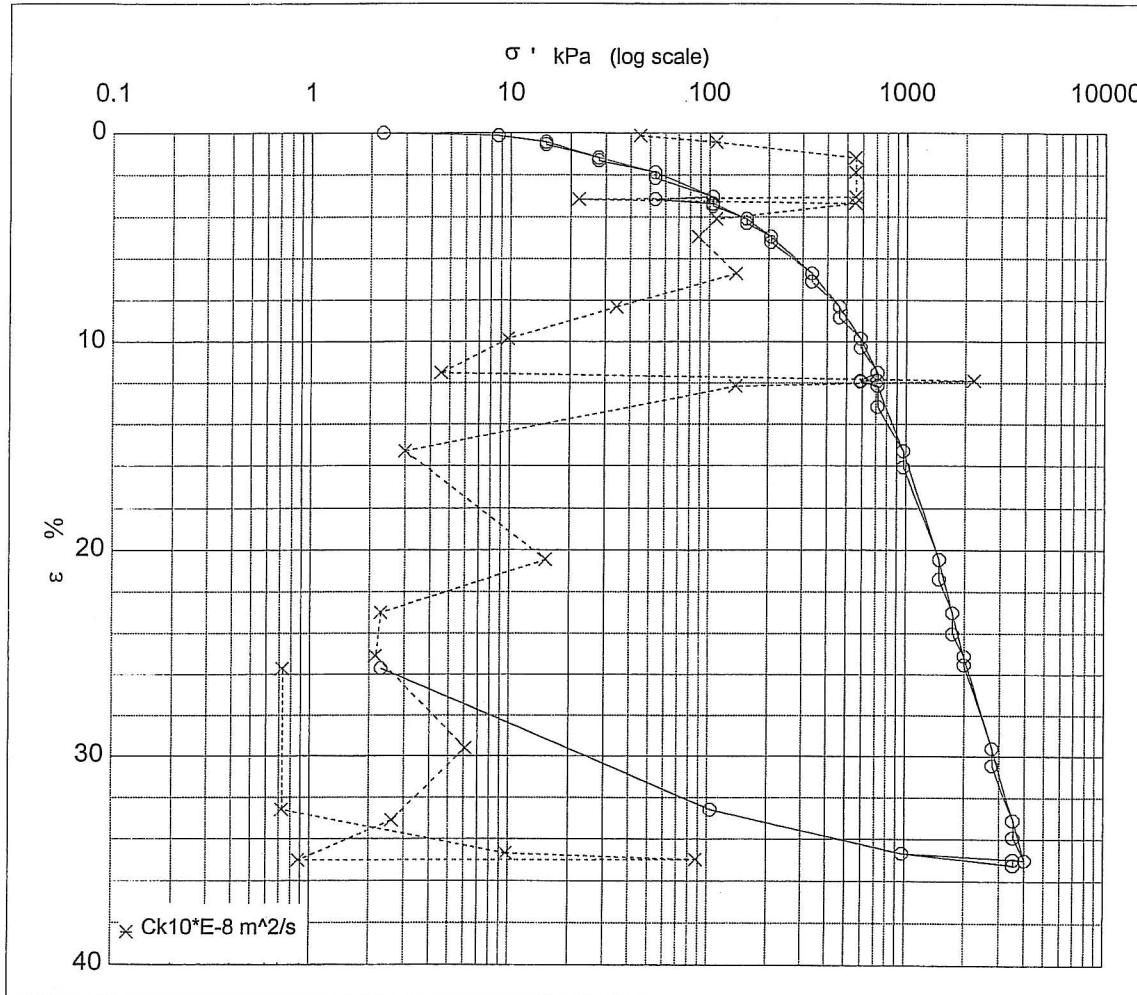
Executed:

AMS/gt

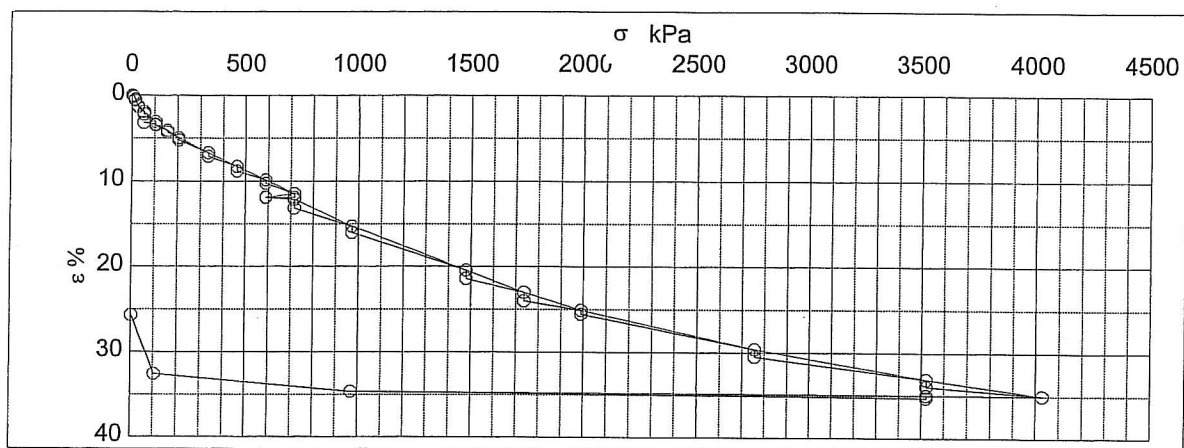
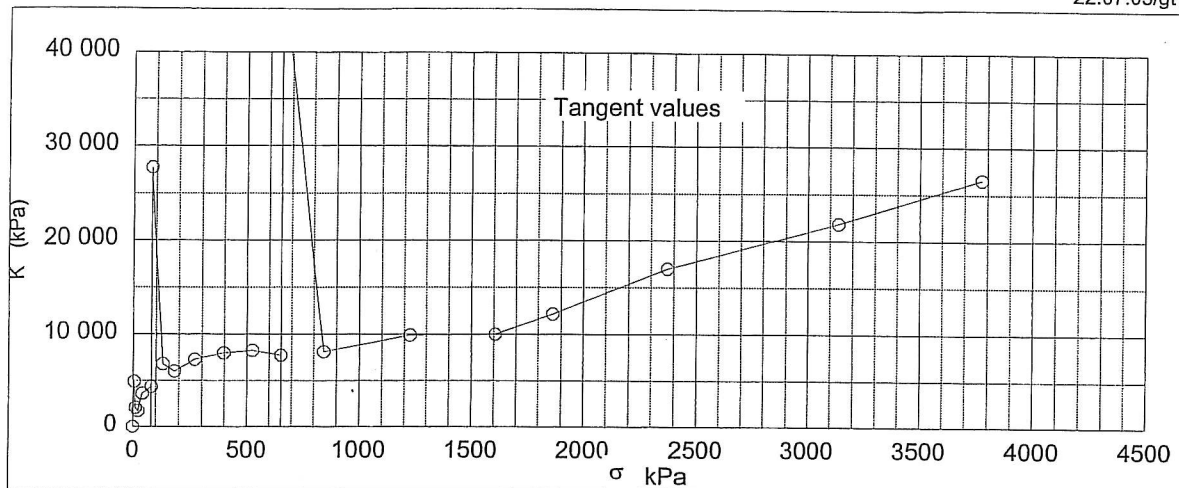
Approved

Checked:

Description of soil: Gytje, mørkebrunt. ferskvandsaflejring. EEM				Water content %	Before	After
				Bulk density Mg / m ³	77.7	53
				Grain density Mg / m ³	1.38	1.47
					~2	
Bor no :	Solsø 1	Overburden pressur σ_o	70 kPa	Void ratio	1.53	1.04
Lab. no:	17	Vane strength c_v	kPa	Degr. of Saturation %	100	100
Level :	8.5 m.b.s.	CPT - value q_c	MPa	Dimension H x D mm	35x70	



Job:	Solsø	AAU
Executed:	AMS/gt	Encl. No 4
Checked:		Approved



Test results		σ' kPa	ϵ_c %	ϵ_s % / lct	ck10 m ² /s	σ'_m kPa	K kPa	w %
Q	32 %	2.3	0.00	-	-	-	-	77.7
Qs	1.7 %	8.7	0.13	0.01	4.49E-07	5.5	4902.1	77.7
σ'_{pc}	>700 kPa	15.0	0.44	0.07	1.09E-06	11.9	2055.7	77.6
		27.8	1.18	0.07	5.50E-06	21.4	1722.3	77.4
		53.3	1.88	0.11	5.50E-06	40.5	3641.5	76.8
		104.3	3.05	0.15	5.50E-06	78.8	4357.4	76.2
		53.3	3.17		2.20E-07	78.8	-43949.6	75.2
		104.3	3.35	0.09	5.50E-06	78.8	27707.4	75.1
		155.2	4.10	0.22	1.09E-06	129.7	6797.5	75.0
		206.2	4.95	0.22	8.80E-07	180.7	5997.8	74.4
		333.7	6.70	0.38	1.38E-06	269.9	7283.1	73.7
		461.1	8.30	0.50	3.44E-07	397.4	7965.9	72.3
		588.6	9.85	0.65	9.78E-08	524.9	8222.8	71.0
		716.0	11.50	0.80	4.55E-08	652.3	7724.5	69.7
		588.6	11.89	0.30	2.20E-05	652.3	-32680.5	68.4
		716.0	12.15	0.90	1.38E-06	652.3	49020.7	68.0
		970.9	15.30	1.25	3.02E-08	843.5	8092.3	67.8
		1 480.8	20.45	1.50	1.53E-07	1 225.9	9899.3	65.3
		1 735.7	23.00	1.70	2.29E-08	1 608.2	9996.4	61.1
		1 990.6	25.10	1.40	2.15E-08	1 863.1	12138.5	59.0
		2 755.3	29.60	1.50	6.09E-08	2 372.9	16993.9	57.3
		3 520.0	33.10	1.30	2.62E-08	3 137.7	21849.2	53.6
		4 029.8	35.02	1.20	8.80E-09	3 774.9	26552.9	50.8
		3 520.0	34.99	0.40	8.80E-07	3 774.9	1544895.5	49.2
		970.9	34.68	0.00	9.78E-08	2 245.5	830318.4	49.2
		104.3	32.59	0.00	7.27E-09	537.6	41468.2	49.5
		2.3	25.71	0.00	7.27E-09	53.3	1481.8	51.2

Remark:

Job:

Solsø

AAU

Encl. No

4a

Executed:

AMS/gt

Approved

Checked:

